

Architettura dei sistemi avionici

Nicola Morganti

6 marzo 2004

Indice

1 Databus	1
2 Le reti	1
2.1 Tecniche di allocazione	3
2.1.1 Frequency Division Multiplexing	3
2.1.2 Time Division Multiplexing	4
2.2 Tecniche di accesso	5
3 ARINC 429	6
4 MIL-STD 1553	9
5 ARINC 429 e MIL-STD 1553 a confronto	11

Figure

1 Collegamenti tra i nodi di una rete: AB collegamento fisico, AE collegamento logico	2
2 Architettura di tipo punto a punto, in alto, e di tipo multipunto in basso	3
3 LRU collegate con databus	4
4 Codifica da binario a BCD	8

1 Databus

I primi calcolatori erano di tipo analogico e quindi soffrivano di alcuni problemi, come ad esempio la necessità di taratura. Si è quindi passato al digitale attraverso trasduttori e convertitori. All'interno del velivolo ci sono una serie di *Line Replaceable Unit*, LRU, progettate ognuna per un singolo compito. Se si danneggia una di queste viene sostituita con una sua gemella. Dentro la LRU ci sono le SRU che sono schede che possono essere sostituite e riparate. Queste scatole hanno bisogno di informazioni che arrivano da altri sistemi, per poi passarle ad altri e così via. Dobbiamo trovare un linguaggio comune che ci permetta di svincolarci dal singolo produttore. Ci sono norme come le ARINC 429, in campo civile e le MIL-STD 1553 in campo militare, secondo le quali le apparecchiature in questione devono scambiarsi le varie informazioni. Vengono quindi adottati, per lo scambio di informazioni, bus digitali, soprattutto in considerazione della enorme quantità di dati da scambiare. Sono sempre più diffusi anche in campo automobilistico oltre che aeronautico, avendo l'enorme vantaggio di una significativa riduzione dei cablaggi oltre a permettere altissime velocità di trasmissione.

2 Le reti

Una rete, o meglio *network*, è costituita da un insieme di terminali o *nodi* e dai *collegamenti* che li uniscono. Nel nostro caso i terminali coincidono con gli equipaggiamenti avionici mentre i collegamenti con i cablaggi dell'impianto stesso. Possiamo distinguere i collegamenti in fisici o logici: i primi corrispondono a un cablaggio diretto da un nodo ad un'altro, mentre i secondi indicano un collegamento tra due nodi aventi un nodo intermedio di transito. Considerando la figura 1 possiamo dire che AB, BD, DE, DC, CE, CA sono collegamenti fisici, mentre AE e BE sono collegamenti logici, nell'ipotesi che i nodi C e D siano in grado di fare da tramite.

In figura 2 abbiamo due diverse architetture di reti: quelle a stella, dette anche **punto a punto** (*point to point*) e quelle **multipunto** (*multipoint o busdrop*). Una rete punto a punto è quella in cui i due nodi sono collegati fra loro senza passare per un nodo intermedio. Poiché i nodi sono adiacenti possibile farli comunicare completamente solo collegando ognuno di essi a tutti gli altri. In questo modo aumenta notevolmente la complessità della rete. L'unico modo per diminuire questa

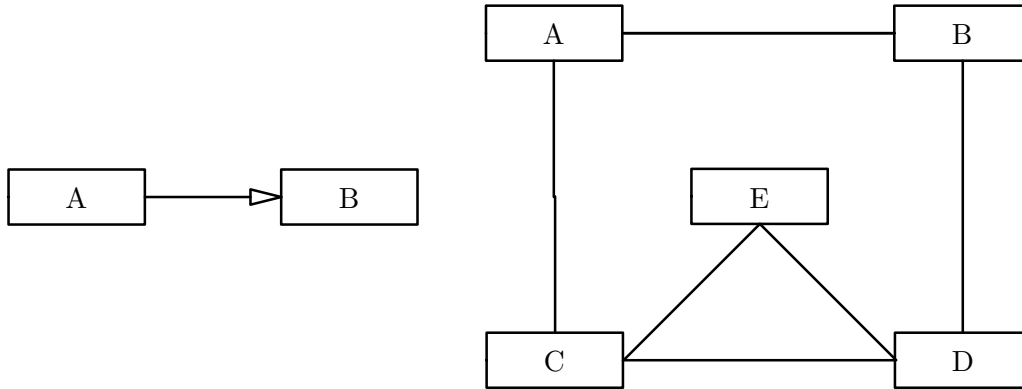


Figura 1: Collegamenti tra i nodi di una rete: AB collegamento fisico, AE collegamento logico

complessità via via crescente è quello di utilizzare dei nodi che possano “girare” le informazioni ad altri nodi, creando così dei collegamenti logici. Tuttavia questo comporta l’utilizzo di nodi sempre più complicati poichè devo avere maggiori capacità. A vantaggio di questa architettura sussiste il fatto che ogni nodo deve sempre comunicare con un altro nodo ben stabilito, passandogli di continuo sempre la stessa informazione (ovviamente di valore diverso al passare del tempo) e ciò semplifica l’interfaccia del nodo ovvero quei circuiti che sono dediti alla trasmissione del messaggio. Una rete multipunto invece è costituita da una sola linea di trasmissione, che prende il nome di **bus**, che viene condivisa da vari nodi. Rispetto quindi alla rete punto a punto l’enorme complessità di connessioni e quindi di cablaggi si riduce drasticamente, con un diminuzione conseguente di peso e di volume occupato. In compenso, ovviamente, devono aumentare le complessità dei nodi. Ogni LRU potrà comunque avere più di un bus (Figura 3).

Con questa topologia di rete è necessario che qualcuno regoli il traffico dei messaggi sul bus, indicando quale nodo può accedere ad esso in un certo istante. Di fondamentale importanza per l’utilizzo di un bus sono:

- il **controllo**, che può essere allocato in un solo nodo o distribuito fra più nodi;
- le **tecniche di allocazione**, che fanno sì che la capacità del bus, che è limitata, sia usata nel modo più efficiente possibile;

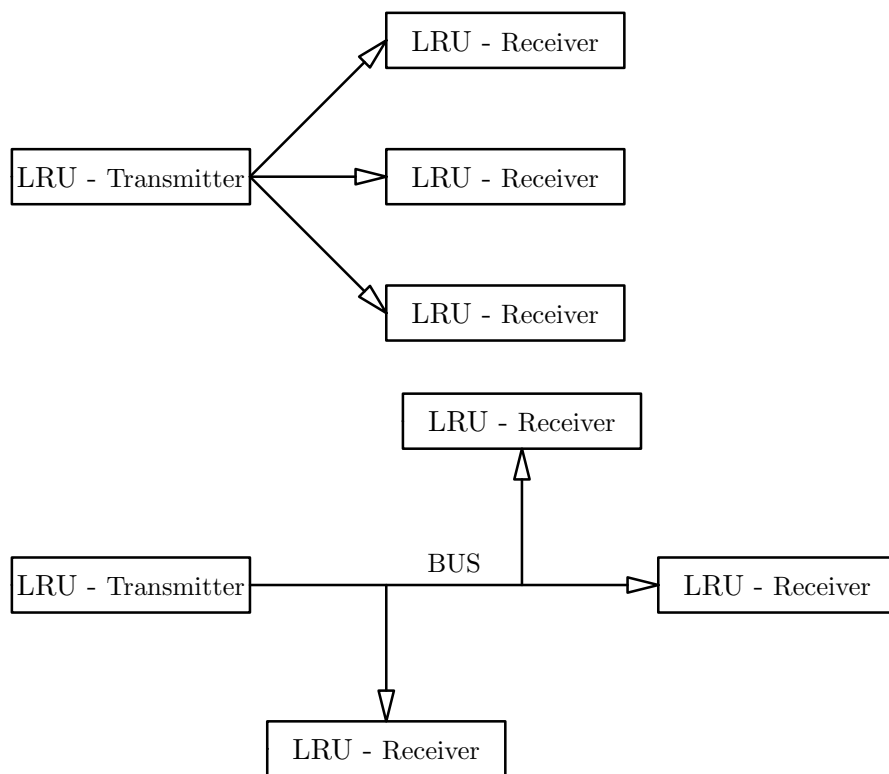


Figura 2: Architettura di tipo punto a punto, in alto, e di tipo multipunto in basso

- le **tecniche di accesso**, che sono l'insieme di regole che consentono ad un nodo di far uso del bus.

2.1 Tecniche di allocazione

La tecnica normalmente utilizzata per rendere il più efficiente possibile l'utilizzo del bus è quella di *multiplexing*. In questo modo un canale di trasmissione, come il bus, è idealmente suddiviso in tanti sottocanali che permettono la trasmissione contemporanea di numerosi differenti segnali. Esistono due tecniche differenti di multiplexing: la *Frequency Division Multiplexing*, FMD, e la *Time Division Multiplexing*, TDM.

2.1.1 Frequency Division Multiplexing

Questa tecnica permette a differenti segnali di essere trasmessi simultaneamente sullo stesso mezzo; con essa la larghezza di banda disponibile viene divisa in tanti

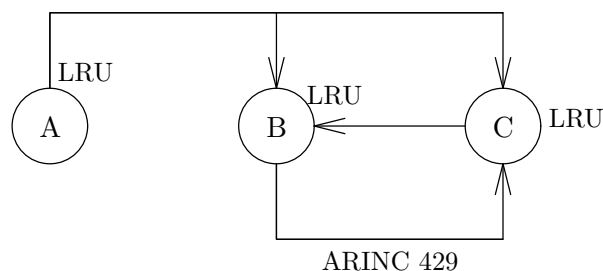


Figura 3: LRU collegate con databus

piccoli canali ciascuno dei quali ha una sua larghezza di banda: ognuno di questi sottocanali viene considerato come un mezzo di trasmissione indipendente. Supponiamo per esempio di avere una rete telefonica che lavori tra i 60000 e i 108000 Hz . Abbiamo quindi una larghezza di 48000 Hz . Poichè la banda usata per trasmettere la voce umana è di 4000 Hz , possiamo suddividere la larghezza di banda in 12 canali distinti ognuno di 4000 Hz . Avremo quindi il che primo canale occuperà la banda da 60000 a 64000 Hz , il secondo da 64000 a 68000 Hz e così via. Ovviamente l'operazione di elevare a frequenza la comunicazione, che come detto prima all'origine era di 4000 Hz , è compiuta dai cosiddetti "modem" (**mod**ulatore/**dem**odulatore) che dall'altro capo del filo hanno il compito di riportare la comunicazione alla banda originaria per renderla comprensibile all'orecchio umano.

2.1.2 Time Division Multiplexing

In questa tecnica ad ogni nodo viene assegnato un ben preciso intervallo di tempo durante il quale esso può utilizzare, per trasmettere o ricevere messaggi, per intero la capacità del bus stesso. Questa assegnazione deve essere fatta naturalmente da un'intelligenza che governa l'uso del bus. La TMD può essere utilizzata per trasmettere sia segnali analogici che digitali e non è detto che a tutti i nodi venga assegnato lo stesso intervallo di tempo: questo dipende sia dalla lunghezza del messaggio che un nodo deve trasmettere che dalla frequenza nel tempo con cui deve essere trasmesso. Per esempio il nodo che trasmette i dati di assetto del velivolo (angolo di beccheggio, rollio e imbardata) ha un accesso maggiore al bus rispetto al nodo che trasmette informazioni sulla posizione in longitudine e latitudine: infatti in un secondo l'assetto di un velivolo può variare molto di più di quanto non vari la sua posizione.

2.2 Tecniche di accesso

Le tecniche di accesso sono i metodi con cui ai nodi viene consentito l'uso del bus e sono usate come arbitro fra i più nodi che vorrebbero usarlo contemporaneamente. Queste possono essere divise tra contenziose e non contenziose: la differenza sta nel fatto che utilizzando una tecnica del primo tipo potremmo avere delle collisioni di messaggi mentre per la seconda questa non succede a discapito di una minor efficienza di utilizzo del bus.

Tra le tecniche più comuni non contenziose abbiamo il *polling* che determina l'ordine con cui i vari nodi hanno accesso al bus in modo da evitare conflitti; la forma più usata è quella in cui un nodo definito "master" svolge il compito di interrogare i vari nodi per vedere chi vuole trasmettere: l'ordine con cui l'accesso al bus viene concesso può essere vario in funzione dell'importanza del messaggio.

Un'altra tecnica, sempre non contenziosa, è il *Token Passing* che è la più utilizzata nelle reti ad anello che non nelle reti a bus; tuttavia essa viene sempre più tenuta in considerazione nelle strutture a bus a fibra ottica ad altissima velocità. Questa funziona grazie a un meccanismo mediante il quale ogni nodo, a turno e secondo un ordine determinato, riceve il diritto di utilizzare il bus. Un pacchetto di bit, che prendono il nome di token, circolano sul bus nel momento in cui su questo non vi è traffico di messaggi, dopodiché, se un nodo vuole trasmettere, "afferra" il token e invia il suo messaggio specificando l'indirizzo del destinatario. È evidente che ogni nodo deve contenere un minimo di intelligenza per riconoscere i messaggi che a lui sono indirizzati. Quando il nodo ha finito di trasmettere, rilascia il token sul bus che quindi risulta disponibile per gli altri nodi. Inoltre il nodo che ha ricevuto il messaggio dovrà trasmettere un messaggio di corretta ricezione al nodo mittente. L'insieme di questi meccanismi fa sì che l'efficienza del bus risulti ridotta a causa della notevole quantità di messaggi "di servizio" che circolano a scapito di quelli informativi.

Le tecniche di tipo contenzioso, che usano quindi messaggi di collisione come gestione del bus, sono denominate *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*, CMA/CD. Queste tecniche consentono a un nodo di inviare il suo messaggio, non appena si accorge che sul bus non c'è traffico (Carrier Sense). In questo modo si elimina una parte sostanziale dei tempi d'attesa tipici delle tecniche non contenziose, visto che in queste un nodo deve attendere l'autorizzazione a trasmettere (polling

o token). A causa però del tempo che un messaggio impiega a propagarsi lungo la rete, due nodi potrebbero accorgersi che il bus è libero praticamente nello stesso momento, in quanto ciascuno di essi non ha ancora avuto il tempo di rilevare il messaggio dell'altro. In questa situazione può quindi succedere una collisione fra i messaggi trasmessi dai due nodi. Questi sono in grado di accorgersene, mentre stanno trasmettendo, misurando il livello di energia che c'è sul bus: infatti una collisione aumenta tale energia al di sopra di un valore di riferimento. Rilevata la collisione un nodo interrompe immediatamente la trasmissione, attende per un certo tempo che può essere di durata fissa o casuale, e successivamente riprova a trasmettere. Poiché non vi è un ordine stabilito per utilizzare il bus, non vi è nemmeno la garanzia di quanto un nodo al massimo deve attendere. Può comunque essere calcolato un tempo medio statistico. Si fa notare quanto l'efficienza di un bus gestito con questa tecnica sia elevata tanto meno collisioni e conseguenti tempi d'attesa si verificano.

3 ARINC 429

Lo standard ARINC 429 (la sigla sta per Aeronautical Incorporation) regola il trasferimento delle informazioni digitali ed è largamente utilizzato sui velivoli civili ma anche su alcuni velivoli militari. Ci da informazioni su come devono essere fatti i cavi di trasmissione. È un mezzo *simplex*, c'è una sola stazione che genera i dati, *source*, e più che ricevono, *sink*, ovvero utilizza una architettura di tipo punto a punto. Il bus è fatto da un cavo schermato ed è dotato di due stabilizzatori di corrente. La schermatura viene messa a massa alle estremità o dove ho interruzioni. Si utilizza una codifica nel sistema binario di 0 e 1. Su un singolo cavo di trasmissione i segnali possono viaggiare in una sola direzione alla velocità di 12.5 *Kbit/s* o di 100 *Kbit/s*. La trasmissione dei dati avviene a ciclo aperto cioè non si richiede al destinatario del messaggio l'accusa di ricevuta. Esistono comunque nel messaggio alcuni semplici controlli dell'integrità di quanto trasmesso.

I messaggi sono composti da parole, *word*, di 32 bit. Alcuni bit di una parola sono rigorosamente dedicati ad una precisa funzione, gli altri possono essere utilizzati a discrezione dell'utente per meglio organizzare la sua trasmissione. Se il bit 1 è il meno significativo, il bit 32 è quello più significativo. Ogni parola è separata da almeno 4 tempi di bit per marcare la trasmissione del 1° bit. Quindi quando il ricevitore di accende aspetta 4 tempi di nullo prima incominciare la ricezione vera e

propria. Il bit può avere uno stato di nullo. Per metà campo di bit non si trasmette niente quindi non è molto conveniente.

Facciamo un esempio di trasmissione dati e consideriamo la linea asincrona RS232. Questa lavora con una tensione di linea minima di 5 V e con stringhe di 8 bit. Nella realtà per la vengono utilizzati altri 2 bit uno di start e uno stop. Questo implica che per trasmettere 8 bit in pratica devo usarne 10.

Il bus ARINC 429 può lavorare su due velocità (o frequenze) come detto in precedenza. Questo comporta che lavorando a 12.5 Kbit/s possiamo di trasmettere 347 parole¹ al secondo mentre lavorando a 100 Kbit/s a 2778 parole al secondo. Dei 32 bit di ogni word inviata, i primi otto sono sempre dedicati all'*etichetta* o *label* della parola stessa, ovvero indicano a che tipo di grandezza si riferiscono i dati contenuti nel resto della parola. La maggior parte di queste etichette è stabilita dallo standard stesso: per esempio il dato di latitudine ha label 310. La label è strutturata nel seguente modo:

1	2	3	4	5	6	7	8
2	1	4	2	1	4	2	1

Alla prima cifra sono dedicati 2 bit, mentre alle altre due 3; ognuna di queste ha un peso differente in base alla posizione che occupa. Se volessimo costruire la label 310 avremmo la seguente situazione

1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	1	0	0	0
2	1	4	2	1	4	2	1

Avremo quindi che il primo carattere avrà peso uguale a 3 in quanto tutti e due i bit che gli competono sono settati a 1, il secondo avrà peso uguale a 1 e il terzo peso 0: si è così costruita la label 310. Ogni *label* identifica cosa contiene la parola e la sigla di identificazione. Normalmente le virgole sono implicite in una certa posizione fissa, in base al dato trasmesso; per esempio se nel *label* riconosco che mi viene trasmesso il numero di Mach, so che ho una virgola prima della prima cifra (es. 0.84). Con gli anni si sono riciclate le *label*, ma come si distinguono? Sono carattere identificativo di come collego i bus. Associa la label a un ricevitore. Ci

¹ricordiamoci che ogni parola è formata da 32 bit più 4 di tempi di gap o nullo

sono quindi 2 bit, il 9 e il 10, che sono di *Source Destination Identification*, ovvero identificano la sorgente e la destinazione della parola. Per i dati ho 18 bit, dal 11 al 28, che trasportano un'informazione. La codifica può essere di tipo binario oppure in *BCD*. In quest'ultimo caso ad ogni 4 bit è associata una cifra (Figura 4).

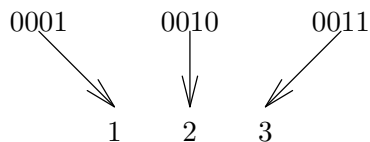


Figura 4: Codifica da binario a BCD

La risoluzione dell'informazione è data dal peso del bit di minor peso, mentre il campo entro cui può variare la grandezza è pari al doppio del peso del bit di maggior peso. I bit 30 e 31 della word sono invece dedicati alla definizione dello stato di funzionamento del nodo trasmettente, per una codifica binaria si avrà:

Bit		
30	31	Stato di funzionamento
0	0	Avaria
1	0	Dati non affidabili
0	1	Trasmettitore in test
1	1	Funzionamento Normale

Infine il bit 32 è il cosiddetto bit di parità: esso vien posto a zero o a uno per fare in modo che il totale di 1 presenti nella parola sia dispari; nel caso in cui io riceva una word con un numero pari di 1, vuol dire che la trasmissione presenta un errore. Riassumendo una word può essere così schematizzata:

32	31 30	28 ... 11	10 9	8 ... 1
Parità	Stato	Dati Trasmessi	SDI	Label

Le LRU comunicano tra loro secondo bus collegati tra loro nei due modi visti prima. Nel bus ARINC 429 abbiamo un solo trasmettitore e fino a 20 ricevitori. Il bus può avere 3 stati, ne può avere anche uno di null per ogni metà tempo di bit, per trasmettere 0 o 1. Se sommiamo i disturbi a entrambe le linee questi si elidono, ecco perchè si usano sempre 2 conduttori.

4 MIL-STD 1553

Questo standard è specifico per applicazioni militari. La struttura della rete è del tipo multipoint, in cui un bus lineare è suddiviso fra più utenti. La gestione del bus è demandata ad un'unità che viene denominata *bus controller* che generalmente è un programma software implementato nel computer centrale del sistema avionico. Gli altri equipaggiamenti prendono il nome di *remote terminal* e posso accedere al bus solo quando vengono autorizzati a farlo dal bus controllore. Questo interroga periodicamente i remote terminal trasmettendo loro dei dati o chiedendo che essi ne trasmettano: la frequenza con cui i remote terminal vengono autorizzati all'uso del bus è prestabilita in funzione della necessità di aggiornamento dei dati che un terminale deve trasmettere o ricevere. Poichè un'avaria del bus controller comprometterebbe il funzionamento dell'intera rete sono generalmente i due componenti in grado svolgere tale compito; il secondo può operare solo in caso di avaria del primo per evitare conflitti di competenza.

La tecnica di accesso utilizzata è quella del polling mentre quella di allocazione è il multiplexing a divisione di tempo (TMD). La velocità di trasmissione è di 1 *Mbit/s*; possono essere collegati al bus 32 equipaggiamenti al massimo, bus controller compreso. Il protocollo utilizzato è il seguente: abbiamo delle "parole", o meglio word, ciascuna composta da 20 bit; di questi indipendentemente dal tipo di parola i primi tre sono riservati alla trasmissione di un segnale di sincronismo, l'ultimo invece è dedicato al controllo di parità. Rimangono quindi 16 bit che sono utilizzati in modo diverso nei tre tipi di parola possibili:

- **Command Word:** è la parola che, trasmessa unicamente dal bus controller, abilita un remote terminal alla trasmissione o ricezione dei dati;
- **Data Word:** è la parola i cui 16 bit liberi sono dedicati al trasporto dell'informazione; un messaggio può comprendere fino ad un massimo di 32 data word;
- **Status Word:** è la parola che contiene informazioni sulla validità dei dati trasmessi e/o sul funzionamento di un remote terminal.

Nella *command word* i cinque bit dopo i tre di sincronismo rappresentano l'indirizzo del remote terminal cui il comando è destinato: poichè con 5 bit si possono codificare 32 indirizzi diversi, si spiega perchè non si possono avere più di 32

equipaggiamenti connessi al bus. Il bit 9 indica al destinatario del comando se deve predisporre in trasmissione o in ricezione; i successivi 5 bit sono relativi ad eventuali sottoindirizzi, che possono ad esempio essere particolari zone di memoria di un computer. I *mode code*, cui sono riservati cinque bit, sono dei particolari comandi inviati ad un terminale: per esempio una richiesta di inviare al bus controller i risultati del test effettuato sul remote terminal per evidenziare eventuali avarie. Non vi è molto da dire sulla *data word*, mentre invece per quanto riguarda le *status word* diciamo solo che i cinque bit dopo i tre di sincronismo indicano l'indirizzo del remote terminal che trasmette la parola di stato, e che ciascuno dei bit successivi indica, quando settato a 1, la presenza di un particolare tipo di errore o di avaria del remote terminal in questione.

Vediamo quindi come si svolge il flusso di parole: inizialmente il bus controller indica ad un remote terminal, mediante una command word, di trasmettere dei dati o di predisporre per riceverne; nel primo caso il remote terminal risponde con una status word cui fanno seguito i dati che gli sono stati chiesti; nel secondo caso il remote terminal riceve i dati in ingresso ed al termine della ricezione invia al bus controller una status word che serve per confermare l'avvenuta corretta ricezione dei dati.

Normalmente lo scambio di informazioni avviene solo fra bus controller e remote terminal, anche se in alcuni casi è permesso il colloquio diretto tra due remote terminal. Inoltre a volte viene utilizzata la trasmissione *broadcast*, in cui un messaggio è inviato simultaneamente a più remote terminal; questi rispondono con una status word per accusare la ricevuta in tempi successivi, perchè se lo facessero tutti insieme causerebbero un conflitto dovuto all'uso contemporaneo del bus. In alcuni casi si decide di non trasmettere affatto la status word.

Il carico massimo di 1 *Mbit/s* normalmente non viene mai raggiunto, mentre carichi normali sono dell'ordine di $0.4 \div 0.6$ *Mbit/s* con punte di 0.8 *Mbit/s*.

Altri parametri molto importanti nell'economia della gestione del bus sono l'*efficienza* e la *latenza*. La prima è data dal rapporto tra il numero di bit di informazione trasmessi e il numero di bit necessari per la gestione della loro trasmissione: in una data word poichè per tramettere 16 bit utili di informazioni dobbiamo utilizzarne 20 è subito detto che la sua efficienza sarà 0.8. La latenza invece viene definita come l'intervallo di tempo intercorrente tra il momento in cui il dato si rende disponibile all'uscita del terminale e quello in cui esso viene interamente ricevuto dall'apparato

che ne ha fatto richiesta. Questa è molto importante perchè se dovesse avere un valore molto elevato la ricezione di due dati da due remote terminal sarebbe intervallata da tempi piuttosto lunghi il che porterebbe ad avere valori disomogenei e quindi non utilizzabili congiuntamente.

5 ARINC 429 e MIL-STD 1553 a confronto

Facciamo ora alcune brevi considerazioni confrontando le caratteristiche dei due standard che abbiamo esaminato con un certo dettaglio. La rete di tipo multipunto (MIL-STD 1553) è realizzabile con una topologia più semplice e quindi con una quantità di cablaggi minore con risparmio notevole in peso; inoltre, in una rete utilizzando ARINC 429, se deve essere aggiunto un nodo nuovo, ovvero un nuovo equipaggiamento, molti degli altri nodi dovranno essere modificati non solo nel software ma anche nell'hardware per aggiungere porte d'ingresso d'uscita. Nel caso di impiego di un bus MIL-STD 1553 è sufficiente allacciare il nuovo equipaggiamento al bus e modificare il software del bus controller per far sì che questo tenga conto della presenza del nuovo componente.

Naturalmente l'ARINC 429 presenta anche dei vantaggi: ad esempio il software di interfaccia degli equipaggiamenti è in questo caso molto più semplice, poichè non è richiesta la stessa intelligenza di cui si ha bisogno negli equipaggiamenti con interfaccia MIL-STD 1553 che devono capire quando sono interrogati e rispondere correttamente.

Comunque anche le organizzazioni civili, per aumentare le esigenze dell'avionica, stanno lavorando ad un bus digitale di tipo multipoint che avrà una velocità di 2 Mbit/s , ma potrà operare senza bus controller grazie all'uso di "timer" selezionabili via hardware su ogni equipaggiamento.